

# DIE «WELT» UNTER DEN VULKANEN

THOMAS PETTKE, WERNER E. HALTER UND CHRISTOPH A. HEINRICH

Vielleicht haben Sie gerade Licht eingeschaltet, um diesen Artikel zu lesen. Vielleicht geistern die letzten Nachrichten betreffend des steigenden Ölpreises noch in ihrem Hinterkopf umher. Nicht unerschöpflich ist die Quelle fossiler Brennstoffe; erneuerbar ist nur die Wasserkraft, predigt die hiesige Energielobby. Seit dem Altertum basieren verblüffend viele menschliche Errungenschaften auf metallischen Rohstoffen: Eine Aufgabe der Geologen ist es, die zukünftige Versorgung unserer Gesellschaft mit essenziellen Metallen zu sichern.

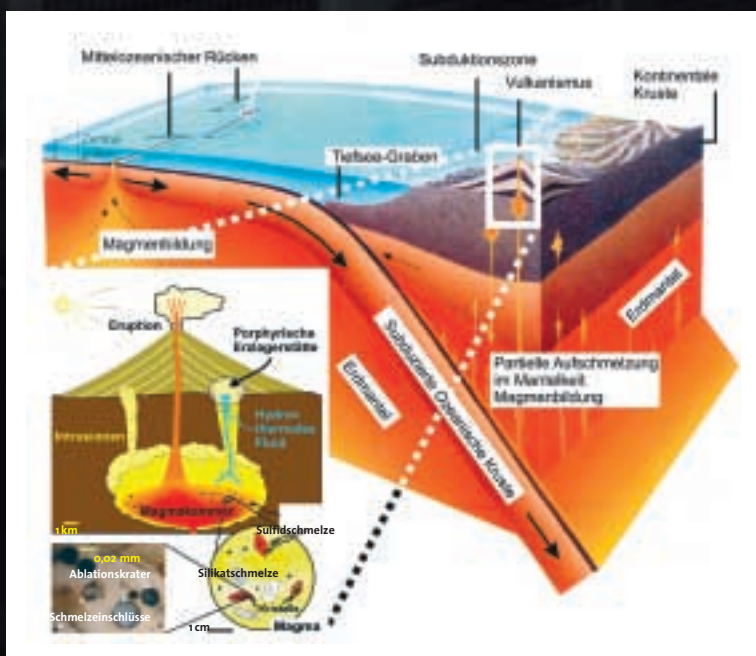


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Subduktionszone. Ozeanische Kruste wird unter kontinentale Kruste subduziert und verliert dabei chemische Komponenten, die eine partielle Aufschmelzung im Mantelkeil bewirken. Diese Schmelzen steigen dann auf und sammeln sich in Magmakammern unterhalb von Vulkanen. Die aufgeblähte Detailansicht zeigt schematisch die Koexistenz von Kristallen, Silikatschmelze und Sulfidschmelztropfen im Magma. Solche Kristalle, hier eine Hornblende, enthalten oft Schmelzeinschlüsse, deren chemische Zusammensetzung mittels Laser-Ablation induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie bestimmt werden kann; Einschlüsse werden einzeln herausgebohrt (siehe Ablationskrater) und analysiert. Erst solche Analysen erlauben es, die Elementverteilungen zwischen diesen unterschiedlichen Phasen zu bestimmen und so die Anreicherungsprozesse von Metallen besser zu verstehen.

Technologien zur Verteilung von Energie wie unser Stromnetz sind selbstverständlich geworden, und die Gesellschaft akzeptiert mit «gutem Gewissen» weiterhin den stetig steigenden, Benzin-basierten Strassenverkehr seit der Verbreitung der Katalysatortechnik. Die Art des gesellschaftlichen Umganges mit den metallischen Rohstoffen ist erstaunlich. Der Verbrauch metallischer Rohstoffe in der modernen Gesellschaft nimmt stetig zu, der Wiederverwertungsgrad ist jämmerlich tief. Das Verbrauchsmaterial Metall ist momentan nicht knapp, doch dessen Gewinnung wird immer aufwändiger, und das Auffinden neuer Lagerstätten wird in den nächsten Jahrzehnten schwieriger werden. Geologen befassen sich damit, das Zusammenspiel verschiedener geologischer Prozesse, die unter Vulkanen zu abbauwürdigen Erzanreicherungen führen können, zu verstehen. Diese Grundlagenforschung trägt dazu bei, neue Vorkommen zu finden und somit den wachsenden Metallverbrauch unserer Gesellschaft mittelfristig zu sichern.

Als Erzlagerstätte verstehen wir, ganz generell, eine hinsichtlich finanziellem und energetischem Aufwand abbauwürdige Masse an metallhaltigem Gestein. Für Kupfer (Cu) in porphyrischen Lagerstätten ist rund 1 Gewichtsprozent notwendig, und die kombinierte Gewinnung mehrerer Metalle (beispielsweise Cu, Gold [Au] und Molybdän [Mo]) erhöht natürlich die Rentabilität des grossräumigen Abbaus. Solche Metallgehalte sind jedoch rund tausendmal höher als jene gewöhnlicher Krusten- und Mantelgesteine. Unsere moderne Forschung befasst sich mit den Schlüsselfragen der geologischen Metallanreicherungsprozesse.

## Grosse Fortschritte in der Analyse kleinster Proben

Vieles, was wir heute wissen, verdanken wir den Fortschritten in der Analytik von geologischen Proben, dem stetig wachsenden experimentellen Datensatz zum chemischen Verhalten der Erzelemente bei Temperaturen über 300 °C und einem Druck, der bis zu 50 000 bar erreichen kann, sowie der numerischen Modellierung nicht direkt beobachtbarer geologischer Prozesse. Laser-Ablation Induktiv-Gekoppelte-Plasma-Massenspektrometrie (LA-ICPMS) erlaubt seit kurzem die chemische Analyse von 0,01 mm grossen Einschlüssen von Fluiden und Gesteinsschmelze in Mineralien (siehe Abbildungen 1 und 2), mit Nachweisgrenzen, die beispielsweise für Gold (Au) unter einem Gramm pro Tonne liegen. Diese bahnbrechende Entwicklung am Departement Erdwissenschaften erlaubt nun erstmals, die Konzentration und Umverteilung von Erzmعادallen zwischen unterschiedlichen Gesteinsschmelzen und hydrothermalen Fluiden – wässrigen, salzreichen Lösungen – direkt zu studieren (siehe Abb. 2). Solche Daten sind essenziell zum besseren Verständnis der Entstehung abbauwürdiger Vererzungen, wie im Folgenden für die Genese porphyrischer Erzlagerstätten illustriert wird.

## Porphyrische Erzlagerstätten: Lieferanten von Metallen

Porphyrische Erzlagerstätten sind mit Magmatismus und Vulkanen über Subduktionszonen assoziiert (Abb. 1) und sind das sichtbare Resultat komplexer Vorgänge in einer

Tiefe von bis zu hundert Kilometern (siehe Artikel Schmidt/Ulmer, S. 50-54). Unmittelbar unter Vulkanen in Tiefen von gewöhnlich weniger als 15 km befinden sich Magmakammern (hier existieren Mineralien schwimmend in Gesteinsschmelze, Abb. 1), welche als zentrale Zwischenstufe in der kontinuierlichen Entwicklung vulkanischer Systeme gelten. Über solchen Magmakammern, jedoch noch unter den Vulkanen, können sich so genannte porphyrische Erzlagerstätten bilden, unsere Hauptquelle von Cu und Mo; sie sind auch wichtige Lieferanten von Edelmetallen wie Au oder Rhenium (Re). Die Entstehungsprozesse von solchen Erzlagerstätten erscheinen prinzipiell einfach, sind aber im Detail sehr komplex und in der Erdgeschichte nur relativ selten verwirklicht.

## Intrusionen und Eruptionen

Die Genese der Gesteinsschmelze ist eng verknüpft mit aus der subduzierten ozeanischen Krustenplatte freigesetzten chemischen Komponenten (unter anderem H<sub>2</sub>O, Alkali- und Erdalkalimetalle, Halogenide, Schwefel), welche dann im darüber liegenden Mantelkeil partielle Aufschmelzung auslösen (Abb. 1). Diese Schmelzen sammeln sich, steigen auf und können Magmakammern bilden. Das zwischenzeitliche Verweilen von Magma in solchen Kammern erlaubt nun einer grossen Anzahl physikochemischer Prozesse, wirksam zu werden. Wichtig dabei sind die periodische Zumischung von Gesteinsschmelze aus der Tiefe und das Aufsteigen von Magma, sei es bis zur Erdoberfläche als Vulkaneruptionen oder sei es als Intrusionen, die in der Kruste

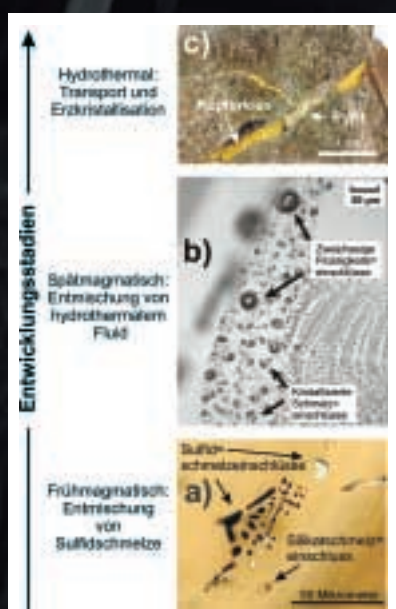


Abb. 2: Drei zentrale Metallanreicherungsphasen in der Genese porphyrischer Erzlagerstätten, chronologisch von unten nach oben illustriert. Abbildung 2a zeigt koexistierende Silikat- und Sulfidschmelzeinschlüsse (schwarz = im Kristall, hell = exponiert an der Oberfläche) in einem Amphibolkristall. Metalle wie Kupfer und Gold gehen zu 99,9% in die Sulfidschmelztropfen. Dieser Prozess findet bei rund 800–1000 °C statt und kann als erste Voranreicherung verstanden werden. Abbildung 2b zeigt koexistierende Einschlüsse von Silikatschmelze und hydrothermale Fluid bei 600–800 °C. Metalle gehen zu 99% in das Fluid über, inklusive jener in Sulfidschmelztropfen, denn diese werden durch das Fluid aufgelöst. Metalle im hydrothermalen Fluid sind gegenüber dem Ursprungsmagma etwa hundertfach angereichert. Abbildung 2c zeigt ein vererztes Gestein mit auffälligen Adern von Kupferkies, Pyrit und Quarz. Die vererzte Gesteinsmasse enthält typischerweise 1 Gewichtsprozent Kupfer und oft bis zu 1 Gramm pro Tonne Gold.

unterhalb der Vulkane stecken bleiben. Essenziell für die Entstehung porphyrischer Erzlagerstätten aber sind – nach neuesten Erkenntnissen in der Grundlagenforschung – chemische Prozesse in der Magmakammer. Die Kristallisation von wasserarmen Mineralien bewirkt, dass sich die verbleibende Restschmelze immer mehr mit gelöstem Wasser anreichert bis zur Sättigung, wo sich ein hydrothermales Fluid entmischt. Dieses ist gewöhnlich salzreich (Salzgehalte sind ein Mehrfaches von Meerwasser) und vermag effektiv eine ganze Anzahl Metalle zu lösen. Messungen der Elementgehalte koexistierender Flüssigkeits- und Schmelzeinschlüsse (Abb. 2b) erlauben nun die direkte Bestimmung von Metallverteilungskoeffizienten zwischen Schmelze und Fluid, entstanden bei rund 700-800 °C in mehreren Kilometern Tiefe. Solche Resultate zeigen, dass der Gehalt an Cu und Au in der Restschmelze (bereits angereichert durch die Kristallisation metallarmer Mineralien wie Feldspäte, Quarz, Amphibole oder auch Pyroxene) bei Fluidsättigung gesamthaft vom Fluid aufgenommen wird, indem die Metalle zusammen mit den Halogeniden und Schwefel fluidlösliche Komplexe bilden. Der Grad der Metallanreicherung liegt hier im Bereiche zweier Grössenordnungen. Sättigen sich nun grosse Teile einer Magmakammer von 10-20 km<sup>3</sup> Grösse, so bildet sich in der Grössenordnung von einer Milliarde Tonnen Erzmetall-beladenes Fluid.

## Mobile Fluide

Solche Erzmetall-beladenen Fluide sind mobil und erfahren aufgrund ihrer geringen Viskosität und Dichte von weniger als 1 g/cm<sup>3</sup> starken Auftrieb. Seichte, fingerförmige Intrusionen bilden oft bevorzugte Wegsamkeiten (Abb. 1). Was nun noch fehlt zur Bildung einer reichen Erzlagerstätte ist das konzentrierte Ausfällen von Erzmineralien in einem möglichst begrenzten Gesteinsvolumen, um eine weitere Aufkonzentration der Erzmetalle erreichen zu können (Abb. 2c). Auch hier ist erneut eine Vielfalt von Prozessen am Werk, wobei die Entmischung des Fluids in koexistierende wässrige, salzreiche Lösung und salzarmen, aber schwefelreichen Wasserdampf und Temperaturabnahme essenziell ist.

## Wie entsteht eine porphyrische Erzlagerstätte?

Sind nun die geologischen Rahmenbedingungen derart, dass fokussiertes, langsames Aufsteigen des Fluids dessen fortschreitende Abkühlung um etliche zehn Grad in einem vertikalen Intervall von wenigen hundert Metern erlaubt, so kann mehr als 90% des Kupfers in Form von Kupfersulfiden ausgeschieden werden (Abb. 2c). Diese Ausscheidungseffizienz resultiert von der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit vieler Metallkomplexe, wie aus Experimenten bekannt ist. Wird nun dieser Ausscheidungshorizont über eine gewisse Zeitspanne von immer

neuem erzbeladenem Fluid durchwandert und verändern sich die geologischen Rahmenbedingungen nur unwesentlich, so ergibt sich eine ausgeprägt lokalisierte Ausfällung von Erzmineralien. Somit ist eine porphyrische Erzlagerstätte entstanden (Abb. 3). Modellberechnungen zeigen (ein kontinuierlicher Prozess ist dabei vorausgesetzt), dass sich solche Lagerstätten innert einigen zehntausend Jahren bilden können.

## Der Metallinhalt porphyrischer Erzlagerstätten

Was genau bestimmt nun die Metallverhältnisse einer Vererzung? Die genetische Bedeutung vorab des Cu/Au-Verhältnisses wird seit Jahrzehnten diskutiert, denn die Anwesenheit von Au ist ein zusätzlicher «Bonus» für den Erzabbau. Neueste Erkenntnisse über den Cu-Au-Metallinhalt von Magmakammern konnten nun aus Analysen kleinster Einschlüsse von Sulfidschmelzen in gesteinsbildenden Mineralien gewonnen werden (Abb. 2a). Ähnlich wie bei einem wässrigen Fluid, können sich ebenfalls geringste Mengen einer Schwefel-Eisen-reichen Schmelze (Sulfidschmelze) aus einem silikatischen Magma früh in dessen Entwicklung entmischen. Analysen koexistierender Sulfid- und Silikat-Schmelzeinschlüsse mittels LA-ICPMS zeigen, dass Metalle wie Cu und Au quantitativ in die Sulfidschmelze gehen. Vergleicht man nun die gemessenen Metallverhältnisse in Sulfid-Schmelzeinschlüssen mit denen des Erz-beladenen hydrothermalen Fluids und



Abb. 3: Tagebau in der Kupfer-Gold-Lagerstätte Bajo de la Alumbrera, argentinische Anden. Täglich werden rund 100 000 Tonnen Erz abgebaut, was nach der Aufbereitung rund 500 Tonnen Kupfer und 60 Kilogramm Gold ergibt. Der elektrisch betriebene Bagger fasst um die 50 Tonnen Erz pro Schaufelladung; die Lastwagen haben eine Nutzlast von 250 Tonnen! Die Erzreserven in Bajo de la Alumbrera werden auf 3 300 000 Tonnen Kupfer und 380 Tonnen Gold geschätzt.



denen der daraus entstandenen Erzlagerrstätte, so sind diese auffallend gleich. Die Metallverhältnisse der Ursprungsschmelze werden also durch die unterschiedlichen Prozesse der Lagerstättengenese (Fluidmischung in der Magmakammer, Fluidaufstieg und die lokalisierte Ausfällung) nur unwesentlich beeinflusst. Grundlegende Schlussfolgerungen sind einerseits die Tatsache, dass bereits Prozesse vor der Magmakammerbildung (Schmelzbildung im Mantelkeil oder sogar bereits die Entwässerung der subduzierten ozeanischen Kruste; Abb. 1) über das Metallverhältnis einer allfälligen Vererzung entscheiden. Andererseits haben Analysen solcher Sulfid-Schmelzeinschlüsse das Potenzial, die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit neu gefundener Erzkörper massgeblich zu verbessern.

### Was bringt die Zukunft?

Der Wiederverwendungsgrad von Metallen nimmt zu, wird aber nie vollständig möglich sein. Neue Rohstoffquellen aus natürlichen Metallanreicherungen in der Erdkruste sind daher auch längerfristig von zentraler Bedeutung für unsere Zivilisation. Neue Vorkommen zu finden ist zunehmend schwieriger, und daher ist ein grundlegendes Verständnis der erzanreichernden geologischen Prozesse immer wichtiger, bis dereinst neue Rohstoffe weit unter der Erdoberfläche vorhergesagt, lokalisiert und vielleicht sogar ohne Abbau in Minen selektiv extrahiert werden können.

### Forschungsinformationen

Thomas Pettke ist Laborleiter der Laserbasierten Plasma-Massenspektrometrie, in der Gruppe «Fluids and ore deposits» von Prof. C. A. Heinrich. Seine Hauptinteressen gelten dem Stoffkreislauf in Subduktionszonen mit Schwergewicht auf der chemischen Analyse mikroskopischer Einschlüsse von Flüssigkeiten und Gesteinsschmelze in Mineralien und deren Bedeutung auch für die Erzlagerrstättengenese.

thomas.pettke@erdw.ethz.ch

Werner E. Halter hat zurzeit eine Förderungsprofessur des Schweizerischen Nationalfonds am Departement Erdwissenschaften und ist Leiter der Gruppe «Magma-Thermodynamik». Seine Forschung befasst sich mit der Struktur, der Thermodynamik und der Entwicklung von Silikatschmelzen in vulkanischen und erzbildenden Systemen.

werner.halter@erdw.ethz.ch

Christoph A. Heinrich ist ordentlicher Professor für mineralische Rohstoffe und Prozesse des Erdinnern und leitet seit 1994 die «Fluids and ore deposits»-Gruppe im Departement Erdwissenschaften. Sein Hauptinteresse gilt den geologischen Bildungsprozessen mineralischer Rohstoffe im Erdinneren.

christoph.heinrich@erdw.ethz.ch

Weitere Informationen unter:

<http://www.erdw.ethz.ch/Heinrich>